

원자로에서 중대사고시 냉각수의 수심과 용융물 성분이 증기폭발에 미치는 영향

김종환[†] · 박익규[†] · 홍성완[†] · 민병태[†] · 송진호[†] · 김희동[†]

The Influence of Water Depth and Melt Composition on a Steam Explosion in Severe Accidents in a Nuclear Reactor

Jong-Hwan KIM, Ik-Kyu PARK, Seong-Wan HONG, Beong-Tae MIN, Jin-Ho SONG and Hee-Dong KIM

Key Words : Severe Accident(중대사고), Steam Explosion(증기폭발), TROI Experiment(TROI 실험), Corium(코륨), Explosivity(기폭성)

Abstract

In the recent TROI experiments, melts of zirconia and two different compositions of corium were used to observe the occurrence of a steam explosion when it came into contact with water at two different depths. The compositions of the corium were 70 : 30 and 80 : 20 in weight percent of UO₂ and ZrO₂, and the mass of the corium was about 10kg. The depth of water in the interaction vessel was 67cm and 130cm. A steam explosion did not occur in the interaction between 80 : 20 corium melt and water at 130cm depth, while steam spikes were observed in the interactions between corium melts of two different compositions and water at 67cm depth. A strong steam explosion occurred in the interaction between 5.43kg of zirconia melt and water at 67cm depth. This fact shows that the explosivity of zirconia is much greater than that of corium.

1. 서 론

1.1 증기폭발 연구의 배경

원자로 발전소에서 중대사고(노심용융사고)가 발생할 때, 원자로 노심이 녹아 냉각수와 반응하여 급격히 증기를 발생시키고 동시에 파괴적인 압력 파가 발생하는 증기폭발을 일으킬 수 있다. 증기폭발이 발생하면 원자로 압력용기나 격납건물의 건전성을 해쳐 방사성 물질을 격납건물 외부로 유출시키고 나아가 대중의 안전을 위협할 수도 있다.

그리하여 증기폭발은 중대사고 연구에서 중요한 쟁점이 되어왔고, 이에 대한 많은 실험적, 해석적 연구들이 수행되었다. 이 중에서 실험적 연구들은 소형 실험[1], 중간 규모의 실험[2, 3, 4], 그리고 노심 원물질을 이용한 실험[5, 6, 7], 그리고 폴리머 수용액을 사용하여 증기폭발을 억제하기 위한 실험[8, 9, 10] 등이 있다.

1.2 TROI 증기폭발 실험의 필요성 및 범위

지금까지의 증기폭발 연구에서 많은 소득이 있었지만, 아직까지 코륨이 증기폭발을 일으키는 지, 그렇다면 열에너지에서 기계적에너지로의 변환률이 얼마인지 등에 대한 쟁점이 남아 있다[11]. 지금까지 ANL 의 ZREX 실험[4]이나 JRC-Ispra 의 FARO/KROTOS 실험[5, 6, 7]에서는 zirconia 나 코륨의 자발적인 폭발이 일어나지 않는다고 알려져 왔다. 그러나 원자로 연구소에서 수행한 TROI 실험에서는 zirconia 나 코륨에서 증기폭발이 발생한 경

[†] 한국원자력연구소

E-mail : kimjh@kaeri.re.kr, gosu@kaeri.re.kr,
swhong@kaeri.re.kr, btmin@kaeri.re.kr,
dosa@kaeri.re.kr, hdkim@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2649 FAX : (042)861-2574

우가 있었다[12, 13, 14, 15]. 본 논문에서는 최근의 TROI 실험 결과를 기술하고, 냉각수의 깊이와 용융물의 성분이 증기폭발 발생에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 알아 보려고 한다.

2. TROI 장치 및 실험순서

2.1 TROI 장치

TROI 실험장치는 그림 1에 나타나 있다. 실험장치는 용융로, 용융로 보호용기, 슬라이딩밸브, 압력용기와 반응용기 등으로 구성되어 있다. 용융로 보호용기와 압력용기는 212°C 에서 20 기압의 압력을 견디게 설계되었다. 용융로 보호용기는 고온(>3000K)의 용융물을 담는 도가니가 설치되어 있으므로 용융물에서 발생하는 복사열을 지탱할 수 있도록 water jacket 으로 설치되어 있다. 여기에 사용된 가열방법은 유도 가열법으로 가열로의 출력은 150kW, 주파수는 50kHz 이다. 압력용기와 반응용기에는 많은 계측장비가 설치되어 있다. 압력용기에는 온도 센서, 동압계, 정압계, 가스 포집 장치 및 고속 카메라가 설치되어 있고, 반응용기에는 온도 센서, 동압계 및 동하중 센서가 설치되어 있다. 용융물의 온도 측정은 용융로 보호용기 상단에 설치된 가시창을 통하여 2 색 적외선 온도계(IRCON 1500~3500°C)로 측정하였다. 이는 용융물 내부에 한쪽 끝이 막힌 텅스텐 튜브를 설치하여 회색체 조건(grey-body condition)에서 용융물과 텅스텐 튜브가 열평형을 이루게 하여 용융물의 내부 온도를 간접적으로 측정하였다.

2.2 실험순서

실험 순서는 먼저 수냉식 도가니에 용융할 물질(코륨이나 zirconia)을 충전한다. 이때 충전한 물질이 산화물이기 때문에 상온에서는 전기전도도가 낮아 유도가열을 받지 않으므로 발화제로 금속 Zr 링을 넣어 둔다. 이렇게 하여 유도가열을 시작하면 Zr 링이 유도받아 온도가 상승하고, 또 이 링이 산화하면서 많은 열을 발생한다. 이때 발생한 열로 주위의 코륨이나 zirconia 가 녹아 전기 전도도가 급격히 증가하여 유도가열이 가능하게 된다. 유도가열의 영향으로 용융물의 온도가 충분히 상승하여 과열도를 지니면, 수냉식 도가니의 하부면을 구성하고 있던 수냉식 plug 을 공압 실린더를 이용하여 제거한다. 이 때에도 용융물의 하부면이 수냉식 plug 의 영향으로 소결되어 있으므로, 용융물이 하부로 흐르지 않는다. 곧 원뿔형의 puncher 를 공압을 이용하여 작동시켜, 소결된 용융물의 하부면을 뚫는다. 이 시점이 모든 동적 신호 수집 및 고속 카메라를 작동시키는 triggering 시간이 된

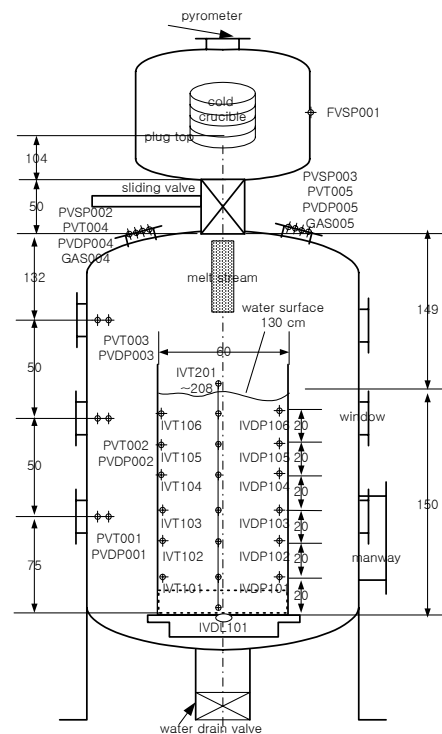


Fig. 1 Schematic diagram of the TROI facility

다. 그 이후, 용융물이 반응용기 속의 물 속으로 떨어져 반응을 일으키고 실험 데이터를 획득하여 실험을 종결한다

3. TROI 실험 결과

3.1 서론

코륨과 zirconia 를 용융물로 사용하여 TROI-23 실험부터 TROI-26 실험까지 4 번의 실험을 수행하였다. TROI-23 실험에서는 80 : 20 (UO₂ : ZrO₂) 코륨을 용융하여 약 10kg 의 용융물을 생성시킨 후 수심 130cm 의 냉각수 통에 낙하시켜 실험을 수행하였다. TROI-24 ~ TROI-26 실험에서는 용융물의 구성비를 바꾸고, 또한 수심을 67cm 로 낮추어 실험을 수행하였다. TROI-24 실험에서는 zirconia 용융물을, TROI-25 실험에서는 70 : 30 코륨 용융물을 사용하였으며, TROI-26 실험에서는 80 : 20 코륨 용융물을 사용하여 실험을 수행하였다. TROI-23 실험에서 TROI-26 실험까지의 실험 인자와 주요 결과는 표 1에 나타나 있다.

3.2 TROI-23 실험 결과

TROI-23 실험에서는 17kg 의 80 : 20 코륨(UO₂ : ZrO₂)을 용융로에 충전하여 10.4kg 의 용융물을 생

Table 1 Initial conditions and results for the TROI tests (TROI-23 ~ TROI-26)

	TROI test number	Unit	23	24	25	26
Melt	Initial Charge Composition	[w/o]	79/20/1	0/99/1	69/30/1	79/20/1
	UO ₂ / ZrO ₂ / Zr					
	Temperature	[K]	3600	3600	3500	3300
	Charged mass	[kg]	17.0	9.5	15.0	17.0
	Initiator mass	[kg]	0.1	0.1	0.1	0.1
	Released mass	[kg]	10.385	5.430	9.005	12.310
	Plug/puncher diameter	[cm]	8.0/6.5	8.0/6.5	8.0/6.5	8.0/6.5
	Initial jet diameter	[cm]	7.4	3.2	8.0	4.5
Free fall in gas	[m]	3.2	3.8	3.8	3.8	
Test Section	Water mass	[kg]	367	189	189	189
	Initial height	[cm]	130	67	67	67
	Final height	[cm]	117	60	64	62
	Cross section	[m ²]	0.283	0.283	0.283	0.283
	Initial temperature	[K]	293	288	287	283
	Sub-cooling	[K]	80	85	86	90
Pressure Vessel	Initial pressure(air)	[MPa]	0.110	0.110	0.110	0.106
	Initial temperature	[K]	296	291	291	288
	Free volume	[m ³]	8.023	8.032	8.023	8.023
Results	Maximum pressurization	PV [MPa]	0.020	0.015	0.021	0.029
	Time to reach peak	[sec]	3	3	3	5
	Maximum PV heat-up	[K]	105	35	90	85
	Time to stabilize	[sec]	10	10	10	25
	Maximum water heat-up	[K]	8	21	22	27
	Time to stabilize	[sec]	5	20	30	35
	Steam explosion		NO	SE	SS	SS
	Dynamic pressure peak	[MPa]	-	5.5	0.2	-
	Duration	msec	-	1.0	1.5	-
	Impulse	kN	-	>500	25	15
	Duration	msec	-	7.0	10.0	20.0
Debris	Total	[kg]	10.385	5.430	9.005	12.310
	>6.35mm	[kg]	1.250	2.805	0.705	1.095
	4.75mm ~ 6.35mm	[kg]	1.505	0.325	1.030	1.720
	2.0mm ~ 4.75mm	[kg]	4.475	0.865	4.135	4.980
	1.0mm ~ 2.0mm	[kg]	1.825	0.595	1.285	2.215
	0.71mm ~ 1.0mm	[kg]	0.500	0.180	0.495	0.720
	0.425mm ~ 0.71mm	[kg]	0.490	0.240	0.655	0.870
	<0.425mm	[kg]	0.285	0.420	0.700	0.710

성시키고 이 용융물이 상온, 대기압의 물이 130cm 까지 차있는 반응용기로 떨어졌다. 이 실험에서는 증기폭발이 일어나지 않았다. 그림 2 는 용융물의 온도를 보여준다. 용융물의 온도는 용융물 방출 전에 3600K 정도까지 상승하였다. 이 그림에서 보이는 온도의 급격한 하강과 상승은 텅스텐 튜브와 적외선 온도계의 재정렬시에 시간이 많이 소요되었기 때문이다. 그림 3 은 홈 비데오로 촬영한 용융물의 주입 모습이다. 이 실험에서는 증기폭발이 발생하지 않았는데, 이는 수심이 깊어 용융물이 물속을 지나는 동안 냉각 및 고화되어 액체와 액

체의 접촉이 일어나지 않아 증기폭발이 발생하지 않았다고 생각된다.

3.3 TROI-24 실험 결과

TROI-24 실험은 용융물의 성분과 냉각수의 수심을 바꾸어 수행한 실험이다. 이 실험에서는 9.5kg의 순수 zirconia 를 용융로에 충전하여 5.43kg의 용융물을 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기에 낙하시켰다. 그림 4 는 용융물의 온도를 보여준다. 용융물의 온도는 용융물 방출 전에 3600K 정도까지 상승하였다. 이 실험에서는 증기

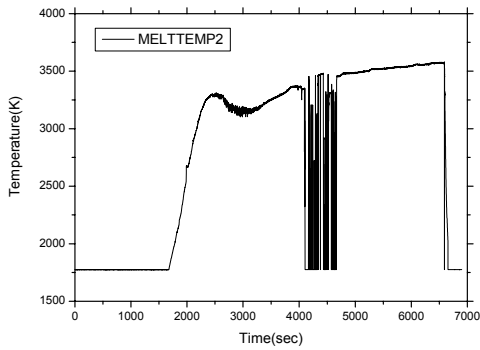


Fig. 2 Melt temperature in the TROI-23 test

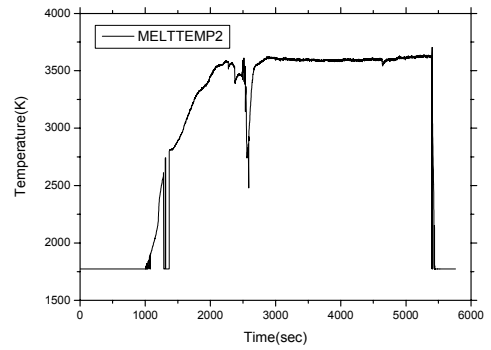


Fig. 4 Melt temperature in the TROI-24 test

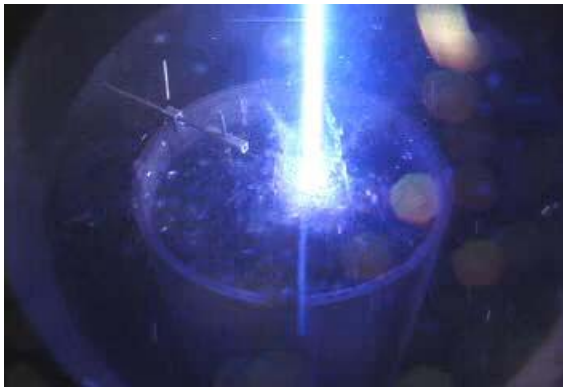


Fig. 3 Melt injection in the TROI-23 test

폭발이 발생하였으며, 이는 동압과 동하중 data 에서 확인 되었다. 그림 5 는 동압 data 로서 최대 5.5MPa 까지 관측되었다. 그림 6 은 동하중 data 로서 최대 500kN 이상이 관측되었다. 이로부터 zirconia 의 증기폭발의 기폭성이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

3.4 TROI-25 실험 결과

TROI-25 실험에서는 용융물을 다시 코륨으로 바꾸어 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 15.0kg 의 70 : 30 코륨(UO₂ : ZrO₂)을 용융로에 충전하여 9.005kg 의 용융물을 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기로 낙하시켰다. 용융물의 온도는 방출 직전에 3500K 정도였다. 그림 7 은 용융물의 방출 모습으로, 굵고 연속적인 용융물 제트가 물속으로 낙하하는 모습이 발견되었다. 이 실험에서는 약한 steam spike 가 발생하였다. 동압 data 에서는 steam spike 의 발생유무를 판단하기 어려웠으나, 동하중이 약 25kN 으로 측정되었으므로 steam spike 가 발생한 것으로 판단하였다. 그림 8 은 동하중을 보여준다.

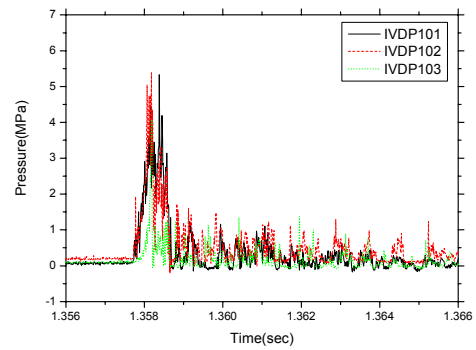


Fig. 5 Dynamic pressure in the TROI-24 test

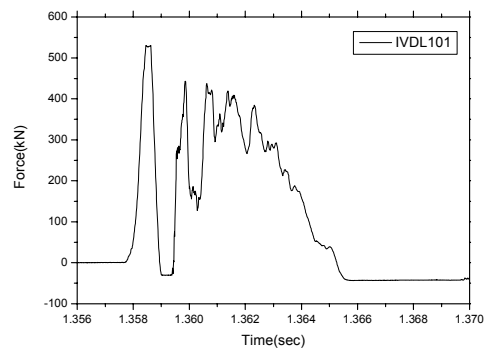


Fig. 6 Dynamic load in the TROI-24 test

3.5 TROI-26 실험 결과

TROI-26 실험에서는 용융물로 80 : 20 코륨을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 17.0kg 의 80 : 20 코륨(UO₂ : ZrO₂)을 용융로에 충전하여 12.31kg 의 용융물을 상온, 대기압의 물이 67cm 까지 차있는 반응용기로 낙하시켰다. 용융물의 온도

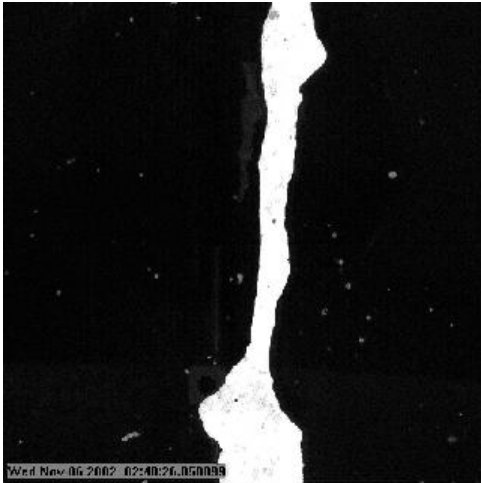


Fig. 7 Melt injection in the TROI-25 test

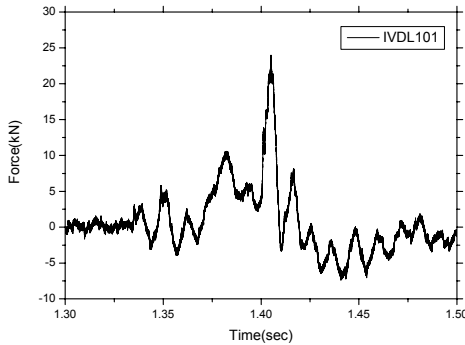


Fig. 8 Dynamic load in the TROI-25 test

는 방출 직전에 3300K 이었다. 이 실험에서도 약한 steam spike 가 발생하였다. 이 실험에서도 동압 data 로는 steam spike 의 발생유무를 판단하기 어려웠으나, 동하중이 약 15kN 으로 측정되었으므로 steam spike 가 발생한 것으로 판단하였다. 그림 9 는 동하중을 보여준다.

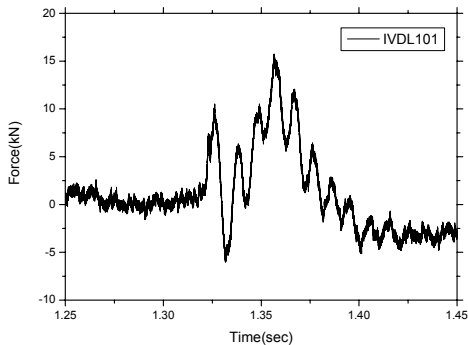


Fig. 9 Dynamic load in the TROI-26 test

4. 결론

TROI-23 실험부터 TROI-26 실험을 수행하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 수심이 깊은(130cm) 경우의 실험인 TROI-23 실험의 경우 증기폭발이 일어나지 않았다. 이로부터 냉각수의 수심이 깊을수록 증기폭발의 기폭이 어렵다는 것을 알 수 있다. 그 원인으로 용융물이 장기간 물 속을 지나면서 냉각되어 바닥에 닿을 때(일반적인 기폭 시점) 고화되어 기폭이 일어나지 않은 것으로 보인다.
- zirconia 용융물을 물과 반응시킨 TROI-24 실험에서 증기폭발이 발생하였으며, 그 때 동압은 최대 5.5MP, 동하중은 500kN 이상으로 측정되었다. 이로부터 zirconia 의 기폭성이 크다는 것을 알 수 있다.
- 코륨(UO₂ : ZrO₂ = 70 : 30) 용융물을 상온의 물과 반응시킨 TROI-25 실험에서는 약한 steam spike 가 발생하였다.
- 코륨(UO₂ : ZrO₂ = 80 : 20) 용융물을 상온의 물과 반응시킨 TROI-26 실험에서도 증기폭발이 발생하지 않고 약한 steam spike 가 발생하였다. 이로부터 코륨의 기폭성이 zirconia 의 기폭성보다 약하다는 것을 알 수 있다.

향후에 코륨의 성분비에 따른 증기폭발 발생유무를 관찰하기 위해 용융물의 성분을 바꿔 실험하려고 하며, 또 증기폭발에서 열에너지로부터 기계적에너지로의 conversion ratio 를 재기 위해 증기폭발을 제어하는 외부기폭 장치를 사용하여 실험하려고 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

참고문헌

- (1) K. Matsumura and H. Nariai, 1996, "Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for a Molten Tin and Water System," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.33, No.4, pp.298-306.

- (2) D. E. Mitchell, M. L. Corradini and W. W. Tarbell, 1981, "Intermediate scale steam explosion phenomena: Experiments and analysis," SAND81-0124, SNL.
- (3) N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka and J. Sugimoto, 1995, "Phenomenological Studies on Melt-coolant Interactions in the ALPHA Program," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.155, pp.369-389.
- (4) D. H. Cho, D. R. Armstrong and W. H. Gunther, 1998, "Experiments on interactions between Zirconium-containing melt and water," NUREG/CR-5372.
- (5) D. Magallon, I. Huhtiniemi, and H. Hohmann, 1999, "Lessons learnt from FARO/TERMOS corium melt quenching experiments," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.189, pp.223-238.
- (6) D. Magallon and I. Huhtiniemi, 2001, "Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.204, pp.369-376.
- (7) I. Huhtiniemi and D. Magallon, 2001, "Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.204, pp.391-400.
- (8) K. M. Becker and K. P. Lindland, 1991, "The Effects of Surfactants on Hydrodynamic Fragmentation and Steam Explosions," KTH-NEL-50, RIT in Sweden.
- (9) M. F. Dowling, B. M. Ip and S. I. Abdel-Khalik, 1993, "Suppression of Vapor Explosions by Dilute Aqueous Polymer Solutions," *Nuclear Science and Engineering*, Vol.113, pp.300-313.
- (10) K. H. Bang and G. D. Jeun, 1995, "Minimum Film Boiling Temperatures for Spheres in Dilute Aqueous Polymer Solutions and Implications for the Suppression of Vapor Explosions," *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol.27, No.4, pp.544-554.
- (11) J. H. Song, I. K. Park, Y. J. Chang, Y. S. Shin, J. H. Kim, B. T. Min, S. W. Hong and H. D. Kim, 2002, "Experiments on the interactions of molten ZrO₂ with water using TROI facility," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.213, pp.97-110.
- (12) I. K. Park, Y. J. Chang, Y. S. Shin, C. H. Kim, B. T. Min, S. W. Hong, J. H. Song and H. D. Kim, 2001, "Steam Explosion Experiments in the Test for Real Corium Interaction with Water (TROI) Program," *Proceedings of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT)*, Washington, USA.
- (13) J. H. Kim, I. K. Park, S. W. Hong, B. T. Min, Y. S. Shin, J. H. Song and H. D. Kim, 2001, "An Experimental Study on Fuel-Coolant Interaction Characteristics on ZrO₂ and UO₂/ZrO₂ Melt," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*.
- (14) J. H. Kim, I. K. Park, S. W. Hong, B. T. Min, Y. S. Shin, J. H. Song and H. D. Kim, 2002, "An Experimental Study on a Steam Explosion with Corium Melt in the TROI Facility," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*.
- (15) J. H. Kim, I. K. Park, S. W. Hong, B. T. Min, Y. S. Shin, J. H. Song and H. D. Kim, 2002, "Observations on Occurrences of Steam Explosions in the Recent TROI Experiments," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*.